

DOI: 10.11779/CJGE201609013

# 水化针刺 GCL+GM 复合衬里的单剪破坏特征

林 海<sup>1,2</sup>, 章玲玲<sup>3</sup>, 阮晓波<sup>4</sup>, 刘小文<sup>1</sup>

(1. 南昌大学建筑工程学院, 江西 南昌 330031; 2. 岩土力学与堤坝工程教育部重点实验室(河海大学), 江苏 南京 210098;  
3. 江西交通职业技术学院建筑工程系, 江西 南昌 330013; 4. 合肥工业大学交通运输工程学院, 安徽 合肥 230009)

**摘 要:** 针刺 GCL 和 HDPE 土工膜(GM)广泛应用于填埋场防渗衬里, GCL 的内部剪切强度和 GCL/GM 界面剪切强度是填埋场复合衬里边坡滑移稳定性的控制因素。通过开展不限定剪切破坏面的水化针刺 GCL+GM 复合衬里大单剪试验, 获得了剪切过程中 GCL/GM 界面位移和 GCL 内部位移发展规律, 分析了 GM 的糙面分别与 GCL 的有纺面和无纺面接触时的峰值强度, 揭示了 GCL+GM 复合衬里的整体剪切破坏特征。试验结果表明: 大单剪试验能够正确和合理地模拟 GCL 与 GM 间的相互作用, GCL+GM 复合衬里中的极限破坏面不仅会随着法向应力的增加而发生转移, 甚至出现 GCL 内部和 GCL/GM 界面同时成为剪切破坏面的临界状态。

**关键词:** 针刺 GCL; 单剪; 破坏特征; 复合衬里; 界面

中图分类号: TU411.99 文献标识码: A 文章编号: 1000 - 4548(2016)09 - 1660 - 08

**作者简介:** 林 海 (1986 - ), 男, 江西上饶人, 讲师, 从事土力学与基础工程教学和岩土工程研究工作。E-mail: linhai@ncu.edu.cn。

## Simple-shear failure characteristics of hydrated needle-punched GCL+GM composite liner

LIN Hai<sup>1,2</sup>, ZHANG Ling-ling<sup>3</sup>, RUAN Xiao-bo<sup>4</sup>, LIU Xiao-wen<sup>1</sup>

(1. School of Civil Engineering and Architecture, Nanchang University, Nanchang 330031, China; 2. Key Laboratory of Geomechanics and Embankment Engineering of the Ministry of Education, Hohai University, Nanjing 210098, China; 3. Department of Architectural Engineering, Jiangxi V&T College of Communication, Nanchang 330013, China; 4. School of Transportation Engineering, Hefei University of Technology, Hefei 230009, China)

**Abstract:** Needle-punched GCL and HDPE geomembrane are widely used in landfill impermeable liner. The internal shear strength of GCL and shear strength of GCL/GM interface are the key factors influencing the slope stability of landfill composite liner. Large-scale simple-shear tests on hydrated needle-punched GCL+GM composite liner are conducted without forcing the shear failure to occur along a pre-determined plane. The development patterns of displacement of GCL/GM interface and internal displacement of GCL are obtained. The peak shear strengths of composite liner when the rough side of GM contacts respectively with the woven geotextile side and the nonwoven geotextile side of GCL are analyzed. The overall shear failure characteristics of hydrated needle-punched GCL+GM composite liner are revealed. The test results show that the large-scale simple-shear tests can correctly and reasonably simulate interactions of GCL and GM. The ultimate failure surface may change with the increase of normal stress, even there may exist a critical state in which both GCL internal surface and GCL/GM interface are the ultimate failure surfaces.

**Key words:** needle-punched GCL; simple shear; failure characteristic; composite liner; interface

## 0 引 言

土工复合膨润土垫 (geosynthetic clay liners, 简称 GCL) 是将薄层膨润土夹持在两层土工布间或黏在土工膜上制成。由于出色的防渗性能, GCL 可作为防渗结构层应用于城市卫生填埋场的衬里系统和覆盖系统中<sup>[1]</sup>。沿衬里界面的滑移破坏是现代城市卫生填埋场的主要破坏型式, 因此 GCL 与土工膜 (GM) 的界

面强度和 GCL 内部剪切强度是复合衬里设计和施工中需要重点考虑的参数<sup>[2]</sup>。与非加筋 GCL 相比, 针刺 GCL 表现出更大的内部抗剪强度, 通常更多地使用在填埋场底部衬里中。在法向应力较低的情况下, 针刺

基金项目: 国家自然科学基金项目 (51268046); 河海大学岩土力学与堤坝工程教育部重点实验室开放基金项目 (GH201404)

收稿日期: 2015 - 09 - 30

GCL 的内部剪切强度明显大于 GCL/GM 的界面剪切强度; 然而在较高的法向应力作用下, 针刺 GCL 的内部剪切强度会与 GCL/GM 界面强度相近甚至更低<sup>[3-4]</sup>。

对于含多层土工合成材料的衬里系统, 可能同时存在两个或更多的潜在危险滑动面。并且随着法向应力的变化, 多层土工合成材料复合衬里内的极限破坏面可能发生转移<sup>[5-6]</sup>。Eid 开展了不限定破坏面的 GCL/GM/粉质黏土复合试样的环剪试验, 结果显示, 随着法向应力的增加, 临界破坏面从针刺 GCL/粉质黏土界面转移至 GCL/GM 界面, 进而转移至 GCL 内部<sup>[7]</sup>。Fox 等开展了不限定破坏面的 GCL+GM 复合界面大直剪试验, 结果表明, 随着法向应力的增加, 破坏面会从 GCL/GM 界面转移至针刺 GCL 内部<sup>[8]</sup>。目前在我国工程领域, 单一固定破坏面的观点已经被广泛接受, 然而采用单个固定破坏面的强度稳定分析结果很可能与实际状态不符。深入了解含 GCL 衬里的复合剪切强度及破坏特征, 有助于优化填埋场设计, 并进一步完善填埋场稳定分析理论。

由于 GCL 内夹钠基膨润土遇水后剪切强度极低, 学者们开展了大量的 GCL 内部剪切强度和 GCL 与其它材料接触面间的界面剪切强度性质研究<sup>[9-14]</sup>。Eid 等近年来开始关注含 GCL 复合衬里的整体剪切强度, 然而目前的试验研究无法获取复合衬里整体剪切过程中的 GCL 内部位移及 GCL 与相邻材料间界面位移。本文通过对大型直剪仪进行改进, 实现了水化针刺 GCL+GM 复合衬里剪切过程中 GCL 内部位移和 GCL/GM 界面位移数据的采集功能; 并且通过开展不限定剪切破坏面的针刺 GCL+GM 复合衬里单剪试验, 研究了 GCL+GM 复合衬里的剪切破坏特征。

## 1 试验仪器和材料

### 1.1 试验仪器

试验采用改进的大型单剪直剪两用剪切仪, 能够实现直径 300 mm 圆形试样的剪切, 如图 1 所示。试样法向荷载通过电脑控制液压油泵调节自动施加, 仪器所能施加的最大法向应力可达 2.8 MPa。剪切盒分为上剪切盒和下剪切盒两部分, 其中上剪切盒在整个试验过程中固定位置不变。仪器的水平剪切是通过两个步进电机调节轴承的转动速度, 进而实现下剪切盒被匀速拉动。下剪切盒与刚性承台之间设置了一排滚珠轴, 从而减小由于施加法向应力引起的下剪切盒与承台间的摩擦力。将剪切仪器改装添加了饱和水槽, 使其能够实现试样的水下剪切。改装后的大单剪仪能够实现较大的剪切位移 (>25 mm), 完全满足 GCL/GM 复合衬里的峰值强度研究需要。

为了能够量测在复合衬里单剪过程中针刺 GCL 的内部位移和 GCL/GM 界面位移, 设计加工制作了多块不锈钢薄层叠环。薄层叠环的外部平面尺寸与下剪切盒相同, 叠环中部直径 300 mm 圆形区域为试样测试区。针刺 GCL 两侧土工布分别与一块薄层叠环固定, 从而可以通过不锈钢薄层叠环的移动情况来分析试验过程中针刺 GCL 的内部及界面剪切位移。



图 1 大单剪仪

Fig. 1 Large simple shear apparatus

试样的剪切位移通过 LVDT 位移传感器量测, 位移值可由电脑读取并记录。如图 2 所示, 下剪切盒与下层叠环处都布置了位移传感器。单剪试验时, 下剪切盒和上剪切盒之间的相对位移为复合衬里上下两端面的总位移, 通过薄层叠环间的相对错动位移可以得到含 GCL 复合衬里内各界面之间的相对位移, 进而可以判断出在一定法向应力条件下含 GCL 衬里内部剪切强度最薄弱层的位置。综合试验过程中的水平单剪应力, 可以得到不限定剪切破坏面情况下含 GCL 复合衬里内部各界面之间的应力-应变关系。

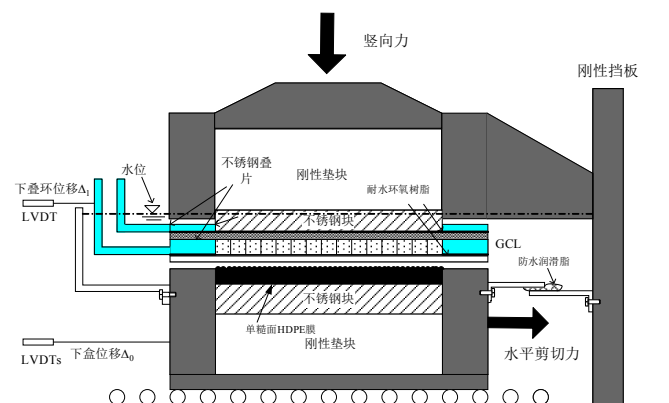


图 2 复合衬里单剪试验示意图

Fig. 2 Schematic diagram of set-up of simple shear tests

### 1.2 试验材料

试验所采用的 GCL 由国内某公司生产, 产品为将约 5 kg/m<sup>2</sup> 的钠基膨润土夹持在一层有纺布和一层无纺布之间, 并采用纤维针刺加筋形成。针刺 GCL 的厚



表1 土工合成材料的岩土参数

Table 1 Geotechnical parameters of geosynthetics

针刺 GCL	厚度 /mm	剥离强度 /(N·10 cm <sup>-1</sup> )	质量面积比 /(g·m <sup>-2</sup> )	膨胀系数 /(mL·2g <sup>-1</sup> )	拉伸强度 /(N·10 mm <sup>-1</sup> )	法向渗透系数 /(cm·s <sup>-1</sup> )
	6	114	5000	25	1560	4.32×10 <sup>-12</sup>
糙面土工膜	厚度 /mm	糙面高度 /mm	密度 /(g·cm <sup>-3</sup> )	屈服强度 /(N·mm <sup>-1</sup> )	屈服伸长率 /%	刺入强度 /N
	1.5	0.26	0.94	27	12	521

度为 6 mm。从 GCL 内部取出的钠基膨润土测得液限为 240%，膨胀系数为 25 mL/2g，针刺 GCL 的相关岩土工程参数如表 1 所示。GM 选用 1.5 mm 厚的单糙面 HDPE 膜，其中光面便于试验固定，糙面则进行试验测试。本文所采用的土工合成材料的岩土参数如表 1 所示。

## 2 试验方法和步骤

### 2.1 试验方法

试验模拟的复合防渗衬里为典型的 GM 下覆针刺 GCL 型式。本文试验方法是在 Fox 等<sup>[8]</sup>的针刺 GCL+GM 复合衬里整体剪切试验研究基础上的改进，能够深入揭示 GCL+GM 复合衬里的剪切破坏特征和峰值强度。大单剪试验的试样布置如图 2 所示。针刺 GCL 下侧面土工布允许发生自由剪切变形，即复合衬里在剪切过程中，不限定破坏面，允许滑动剪切破坏自由发生于内部最软弱面。

试验开始前，在下剪切盒中放置刚性垫块，然后将 GM 的光面与不锈钢金属垫块采用特种 PE 胶水黏结后置于下剪切盒中。通过调整下剪切盒内刚性垫块的厚度，使得 GM 试样的糙面刚好高于下剪切盒。针刺 GCL 试样铺设于 GM 之上并与 GM 的糙面直接接触。针刺 GCL 两侧面土工布的固定和位移测量通过不锈钢薄层叠环来实现（如图 2）。下层叠环与 GCL 界面以及下剪切盒与 GCL 界面在剪切过程中由于接触会产生一定的摩擦力，该摩擦力无法避免，并且可能会使试验所测水平剪切力结果偏大。尽管如此，标定试验证实，上述两个界面上剪切盒自重压力下的最大摩擦力上不超过 0.2 kN。将其换算为应力后与试样剪切应力峰值相比，摩擦力引起的试验系统误差在法向应力  $\sigma_n=100$  kPa 时小于 5%，在  $\sigma_n=300$  kPa 时小于 2%，并且误差会随着法向应力的增加继续减小。因此，为了简化分析，忽略了这些界面引起的摩擦力影响。

复合衬里单剪试验分为两个系列：GCL(A)+GM 复合衬里为 GCL 的无纺面与 GM 的糙面接触的情况，GCL(B)+GM 复合衬里为 GCL 的有纺面与 GM 的糙面接触的情况。对于 GCL(A)+GM 复合衬里，试样剪切时的法向应力分别为 117, 215, 310, 505, 725, 910, 1305 和 1835 kPa；对于 GCL(B)+GM 复合衬里，试样

分别在法向应力 110, 317, 505, 713, 910, 1315 和 1804 kPa 下进行剪切。试验所选取的法向应力基本涵盖了填埋场衬垫中 GCL 能遇到的各种压力情况。

### 2.2 试验步骤

首先，从同一卷 GM 上剪下若干个直径 300 mm 的圆形试样。将 GM 的光面与圆形不锈钢垫块黏牢后置于下剪切盒中。前期试验发现，当法向应力高于 500 kPa 时环氧树脂胶水不能较好地固定 GM 和不锈钢垫块，剪切过程中可以肉眼观察到 GM 与黏结垫块间发生了脱开现象。因此，采用专门的有机 PE 胶水来黏结固定 GM，经试验证实，即使在高法向应力下 GM 的固定效果良好。在下剪切盒中放置若干刚性垫块，然后将固定好的 GM 试样放入下剪切盒中。刚性垫块可以提供足够的抗压能力并且减小 GM 试样在高压下的沉降。调节刚性垫块的厚度，使得 GM 的糙面在受压时刚好高出下剪切盒平面。

从同一卷针刺 GCL 材料中剪下 370 mm×370 mm 面积的方形试样。除试样中心直径 300 mm 的圆形面积外，将其他部位 GCL 的加筋纤维小心剪断。然后将加筋纤维已剪断部位处的膨润土小心地移除，尽量不影响试样中心区域的膨润土分布情况。对于 GCL 的无纺布面与 GM 的糙面接触的情况，将一块不锈钢薄层叠环用环氧树脂与 GCL 的无纺布面从内侧黏结，同时 GCL 的有纺面与另一块叠环和不锈钢多孔垫块从外侧用环氧树脂黏结（如图 2）。叠环和垫块与 GCL 黏结后，给予其一定压力作用并保持 24 h 以上，保证环氧树脂能够具备足够的黏结强度，从而确保薄环在试验过程中能够与 GCL 同步移动。借鉴已有的研究成果，GCL 试样的水化分两步进行。第一步，将黏牢后的 GCL 试样放入盛水容器中，加入水并浸没试样，对 GCL 试样施加 1 kPa 左右的压力以减小不均匀膨胀并持续 48 h。第二步，将 GCL 试样放入大单剪仪并铺设于 GM 的糙面之上，将上剪切盒架在 GCL 试样之上固定并刚好卡住黏结 GCL 上表面的金属垫块，即实现对 GCL 上表面的固定。然后在上盒中放入刚性传力垫块，接着将 LVDT 位移传感器布置就位。启动仪器并施加法向应力，向单剪仪饱和水槽内加水并浸没 GCL 试样。水位控制在高于 GCL 上表面 5 mm 左右。在法向应力下作用下固结水化一到两天的时间，即完成

GCL 试样的水化阶段。

对于针刺 GCL 的有纺面与 GM 糙面接触的情况 (GCL(B)+GM), 将 GCL 的上下土工布面转换即可, 制样方法和步骤与 GCL(A)+GM 复合衬里相同。考虑到 GCL 的内部剪切强度和 GCL/GM 界面剪切强度与剪切方向有一定的关系, 本文试验将所有 GCL 试样都制备沿材料机器加工方向剪切。大量剪切试验证实, 当剪切速率接近或小于 0.1 mm/min 时, GCL 内部剪切试验可以忽略应变率效应影响<sup>[13]</sup>; 而对于 GCL/GM 界面剪切试验, 当剪切速率小于 1 mm/min 时, 剪切速率对试验结果的影响不大<sup>[12, 14]</sup>。基于前人研究成果, 所有试验设定的剪切速率都为 0.1 mm/min<sup>[8]</sup>。试验过程中可以测量两个位移值 ( $\Delta_0$  和  $\Delta_1$ ), 大单剪试验的总位移就等于  $\Delta_0$ , 而  $\Delta_1$  代表了 GCL 的内部位移, GCL/GM 界面位移可由  $\Delta_0 - \Delta_1$  计算得到。

### 3 水化针刺 GCL+GM 复合衬里位移发展规律

针刺 GCL+GM 复合衬里单剪过程中各界面位移随时间的发展关系如图 3 和图 4 所示。单剪总位移 ( $\Delta_0$ ) 随时间匀速变化, 正反映了匀速剪切的试验过程。整个试验过程中, 衬里内部存在某个界面位移随剪切而持续增加, 则该界面为复合衬里的剪切破坏面。

#### 3.1 GCL(A)+GM 复合衬里

从图 3 (a) ~ (c) 可以看出, 当  $\sigma_n \leq 310$  kPa, 针刺 GCL 内部位移在剪切初期增长速度快于 GCL/GM 界面位移。随着剪切时间的进行, 针刺 GCL 内部位移变慢并且稳定在一个恒定的值左右。与此同时, 针刺 GCL/GM 界面位移发展速率变快并且成为最

终的破坏面。

如图 3 (d) 所示, 当  $\sigma_n = 501$  kPa 时, 复合衬里剪切开始后针刺 GCL 内部位移和 GCL/GM 界面位移以相似的剪切速率发展 ( $t < 7000$  s), 并且两界面的最终位移量几乎相等。说明  $\sigma_n = 501$  kPa 时 GCL+GM 复合衬里中针刺 GCL 内部和 GCL/GM 界面同时发生了剪切破坏。

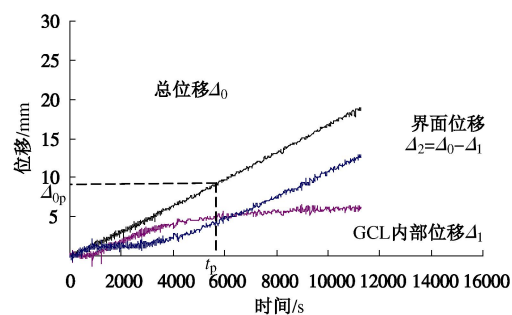
当  $\sigma_n = 725$  kPa 时, 剪切前期针刺 GCL 内部和 GCL/GM 界面位移以相似的速率发展 ( $t < 6000$  s)。但随着剪切的继续, 针刺 GCL 内部位移发展变快而 GCL/GM 界面位移达到一个稳定的值 (约 5 mm) (如图 3 (e))。  $\sigma_n = 725$  kPa 时, 复合界面的剪切破坏位置发生在针刺 GCL 内部界面。

当  $\sigma_n \geq 910$  kPa 时, 针刺 GCL 内部位移变得显著大于 GCL/GM 界面位移 (如图 3 (f) ~ 3 (h))。复合衬里发生典型的针刺 GCL 内部破坏, 并且整个剪切过程中 GCL/GM 界面只有很小的位移 (小于 3 mm)。

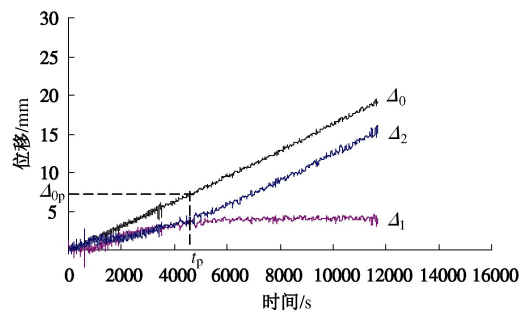
GCL(A)+GM 复合衬里的单剪破坏面会随着法向应力的增加, 从 GCL/GM 膜界面转移至针刺 GCL 内部, 发生复合衬里破坏面转换的临界法向应力接近  $\sigma_n = 501$  kPa。

#### 3.2 GCL(B)+GM 复合衬里

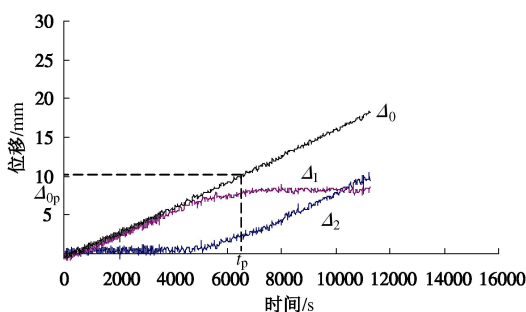
从图 4 中可以看出, 在试验测试的所有法向应力下, 剪切初期针刺 GCL 内部位移比 GCL/GM 界面位移增加更快。然而随着剪切的进行, GCL/GM 界面位移都会超过 GCL 内部位移。在试验的所有法向应力下, 发生最大位移的界面总是处于 GCL/GM 界面。GCL+GM 复合衬里在所有测试应力范围内没有发生破坏面的转换, 并且都只发生在 GCL/GM 界面。



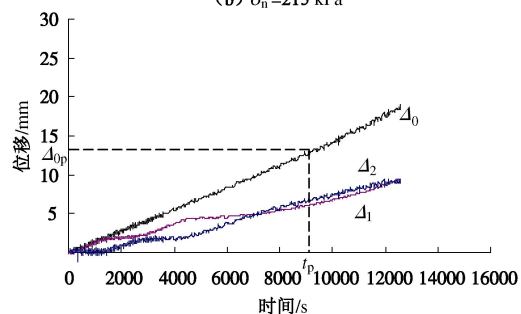
(a)  $\sigma_n = 117$  kPa



(b)  $\sigma_n = 215$  kPa



(c)  $\sigma_n = 310$  kPa



(d)  $\sigma_n = 501$  kPa



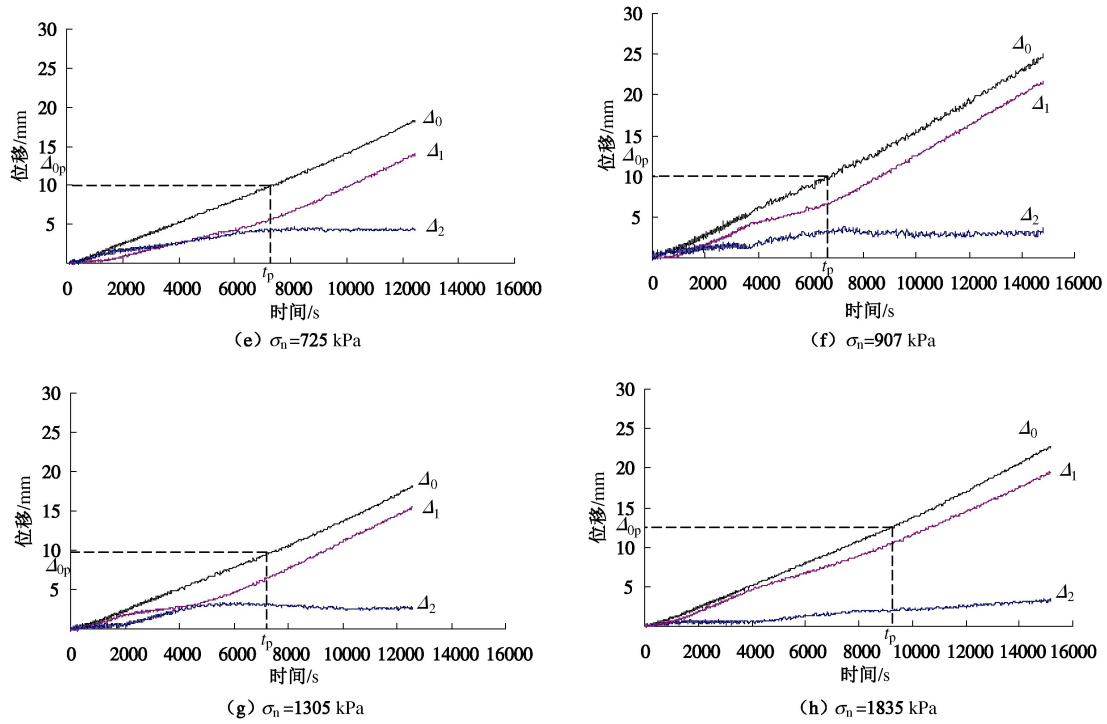
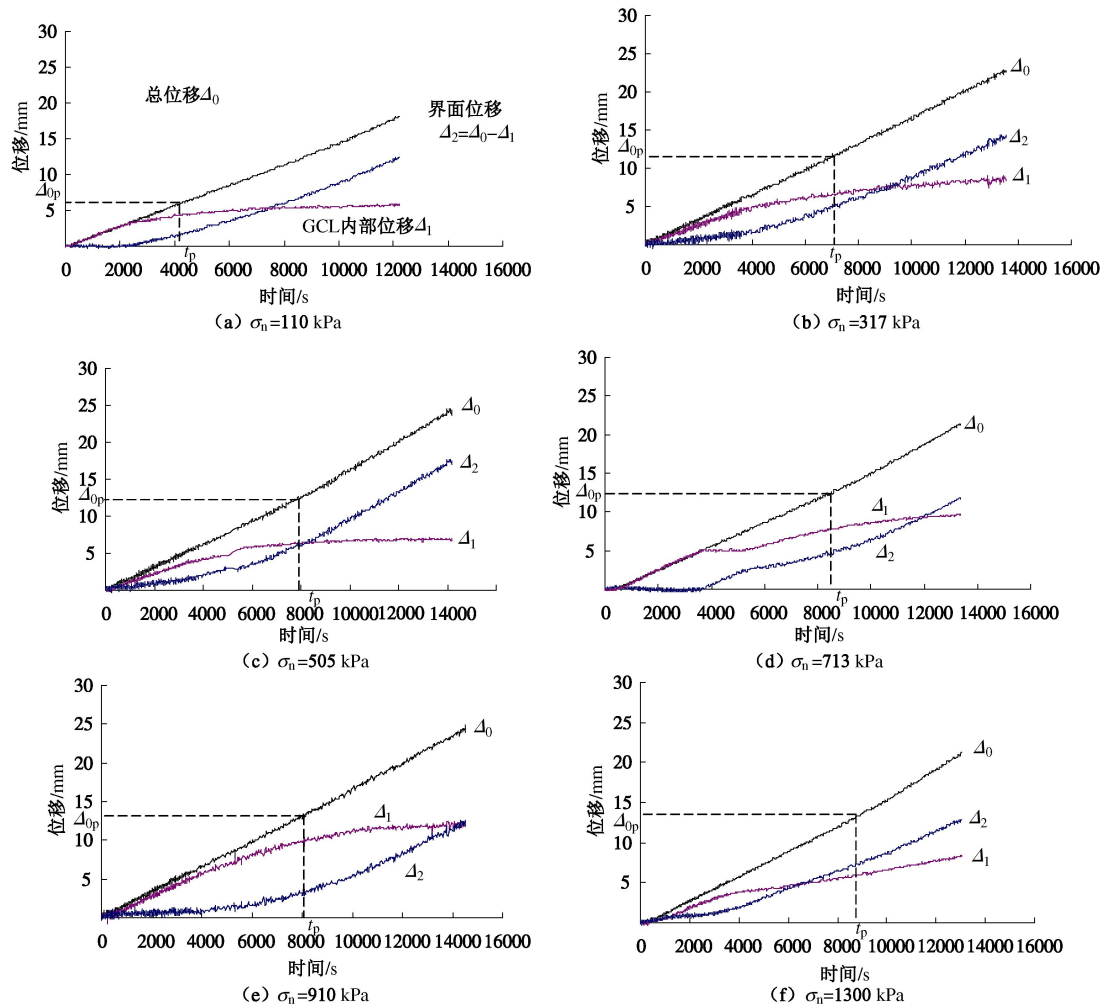


图3 GCL(A)+GM 复合衬里单剪各界面位移发展规律

Fig. 3 Patterns of development of each displacement for GCL(A)+GM composite liner



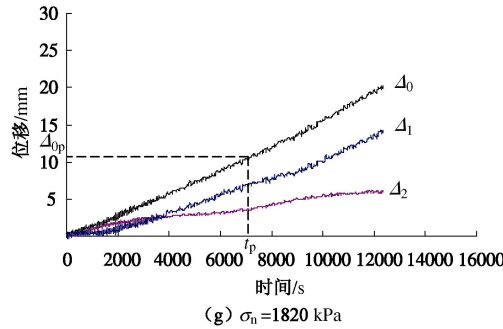


图 4 GCL(B)+GM 单剪各界面位移发展规律

Fig. 4 Patterns of development of each displacement for GCL(B)+GM composite liner

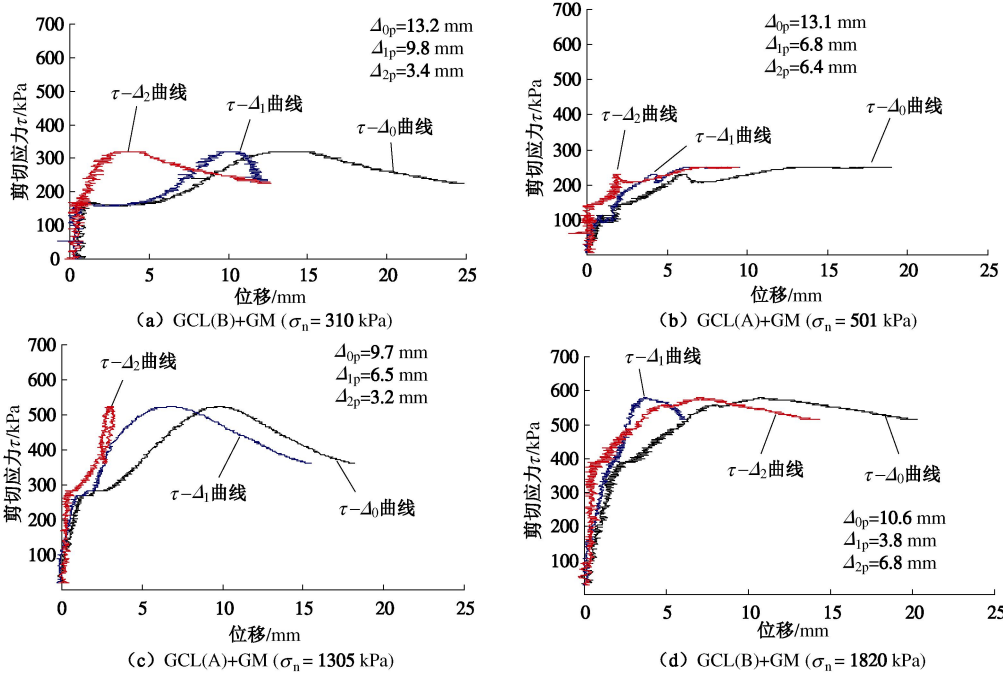


图 5 复合衬里单剪应力位移关系图

Fig. 5 Shear stress-displacement relationship for GCL+GM composite liner

当 $\sigma_n \leq 713$  kPa 时, GCL 内部位移曲线都表现为“下弯”的形状, 最终会达到一个趋近恒定的值(图 4(a)~4(d))。而当 $\sigma_n > 713$  kPa 时, GCL 内部剪切位移会随着剪切进行一直缓慢地增加, 最终不会达到一个稳定值(图 4(e)~4(g))。结合试验后的 GCL 试样观察发现, 当 $\sigma_n > 713$  kPa 时, 一直缓慢增加的 GCL 内部位移是由于 GCL 内部发生了局部剪切破坏。因此, GCL(B)+GM 复合衬里在高法向应力下主要表现为界面破坏, 而部分 GCL 内部破坏也同时存在。

#### 4 应力位移关系

水化针刺 GCL+GM 复合衬里的单剪应力位移关系曲线总体分为 4 种型式, 如图 5 所示。应力位移关系图中包含 3 条曲线, 分别为剪切应力( $\tau$ ) - 单剪总位移( $\Delta_0$ )曲线、剪切应力( $\tau$ ) - GCL 内部位移( $\Delta_1$ )曲线和剪切应力( $\tau$ ) - GCL/GM 界面位移( $\Delta_2$ )曲线; 图中 $\Delta_{0p}$ ,  $\Delta_{1p}$ 和 $\Delta_{2p}$ 分别代表 $\tau - \Delta_0$ ,  $\tau - \Delta_1$ 和 $\tau - \Delta_2$ 曲线达到应力峰值时对应的位移。复合衬里达到剪

切应力峰值所需总位移 $\Delta_{0p}$ 为 9.5~13.5 mm, 该值随着法向应力的增加而减小。

法向应力较小时(对于 GCL(A)+GM 复合衬里:  $\sigma_n \leq 310$  kPa; 对于 GCL(B)+GM 复合衬里:  $\sigma_n \leq 713$  kPa), 水化针刺 GCL+GM 复合衬里的单剪应力总位移关系( $\tau - \Delta_0$ 曲线)与 GCL/GM 界面应力位移关系( $\tau - \Delta_2$ 曲线)型式一致, 复合衬里的剪切破坏发生在 GCL/GM 界面, 如图 5(a) 所示。

GCL(A)+GM 复合衬里在 $\sigma_n = 501$  kPa 时的单剪应力位移关系如图 5(b),  $\tau - \Delta_0$ 曲线与 GCL 内部或 GCL/GM 界面的剪切应力位移曲线有很大的差异, 剪切应力在经过峰值后随位移增加折减的趋势更加平缓; Fox 等在 GCL/GM 整体剪切试验中得到类似的结果。从图 5(b) 可以看出, 当 $\sigma_n = 501$  kPa 时 GCL 的无纺面和 GM 的糙面之间的界面抗剪强度与 GCL 内部界面的抗剪强度非常相近, 结合两界面的位移发展规律(如图 3(d)), 证实两界面同时发生了剪切破坏。由于两相邻滑动面间的相互影响, 造成两滑动面上出

现剪切位移发展不均匀,进而导致复合衬里的 $\tau - \Delta$ 曲线型式明显区别于各单个界面剪切试验的情况<sup>[15]</sup>。

GCL(A)+GM 复合衬里在法向应力较大的情况下( $\sigma_n \geq 910$  kPa),  $\tau - \Delta_0$ 曲线形状和 GCL 内部剪切应力位移关系( $\tau - \Delta_1$ 曲线)相似,图 5(c)表现了剪切破坏面位于 GCL 内部情况下的复合衬里单剪应力位移关系。

对于 GCL(B)+GM 复合衬里,当 $\sigma_n \geq 1300$  kPa 时,复合衬里剪切达到峰值应力后 GCL 内部位移和 GCL/GM 位移持续增加,然而 GCL 的内部位移变得小于 GCL 的有纺面与 GM 的糙面之间的界面位移,说明复合衬里的单剪破坏面仍然主要位于 GCL 的有纺面与 GM 的糙面之间的界面(图 5(d))。

### 5 单剪峰值强度和破坏模式

水化针刺 GCL+GM 复合衬里的单剪峰值强度如图 6 所示,图 6 中的实线和虚线分别为 GCL(A)+GM 复合衬里和 GCL(B)+GM 复合衬里复合衬里的单剪峰值强度包线。GCL+GM 复合衬里单剪峰值强度包线对法向应力表现出一定的非线性,并且峰值强度摩擦角随法向应力的增加而减小。在测试的所有法向应力下,GCL(A)+GM 复合衬里单剪峰值强度都要高于 GCL(B)+GM 复合衬里单剪峰值强度。这说明在填埋场施工时,将 GCL 的无纺面与 GM 的糙面接触摆放,能够增强复合衬里的抗滑移破坏稳定性。

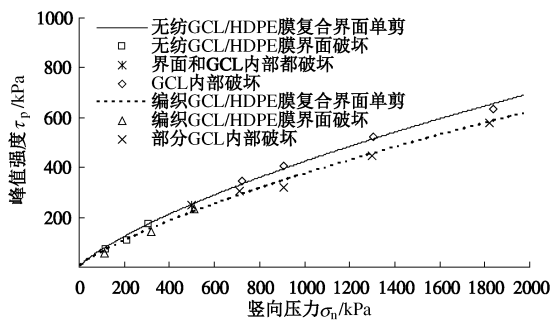


图 6 针刺 GCL+GM 复合界面的峰值强度及破坏模式

Fig. 6 Peak shear strength envelopes and failure modes of needle-punched GCL+GM composite liner

水化针刺 GCL+GM 复合衬里在不同法向应力下表现出不同的单剪破坏模式(如图 6)。GCL(A)+GM 复合衬里在较低法向应力下( $\sigma_n \leq 317$  kPa)表现为完全的界面破坏;在 $\sigma_n = 501$  kPa 时表现出界面和 GCL 内部同时发生破坏的模式;在法向应力较大( $\sigma_n \geq 725$  kPa)时,表现为完全的 GCL 内部剪切破坏。GCL(B)+GM 复合衬里在所有测试应力下( $110$  kPa $\leq \sigma_n \leq 1820$  kPa)都表现出界面破坏的模式。然而在较大应力时( $\sigma_n \geq 713$  kPa),GCL 也会发生局部内部破坏。复合界面单剪破坏模式也可通过试验完成后观察到的现象得到证实。在法向应力作用下或剪切力的作用下,GCL 内夹膨润土都会从土工布侧发生挤出

象。通过观察挤出膨润土在 GM 上的分布也可以分析得到复合界面在对应法向应力下发生的破坏模式。GCL(A)+GM 复合衬里单剪试验后膨润土在 GM 糙面上的分布如图 7(a)、(b)所示。法向应力较小( $\sigma_n = 310$  kPa)时,从 GCL 的无纺面挤出膨润土的量很少,但可以观察到剪切过后 GM 界面划过的痕迹,说明剪切破坏发生在 GCL/GM 界面上(图 7(a))。对于较高法向应力下( $\sigma_n = 1820$  kPa) GCL(A)+GM 复合衬里单剪过后,残留在 GM 上的膨润土量随法向应力增加而增加,并且 GM 上面的膨润土没有表现出曾经沿某一个方向滑动过,整个 GM 上的膨润土分布呈散点状,说明复合界面单剪的破坏面发生在 GCL 内部(图 7(b))。

GCL(B)+GM 复合衬里单剪试验后膨润土在 GM 上的分布如图 7(c)、(d)所示。从图 7(c)中可以看出,法向应力较小( $\sigma_n = 317$  kPa)时,从 GCL 的有纺面挤出膨润土的量较少,但可以明显观察到剪切过后 GM 界面划过的痕迹,这代表了典型 GCL/GM 界面剪切破坏的模式。如图 7(d)所示,对于法向应力比较大的情况( $\sigma_n = 1820$  kPa),GM 表面既可以看到明显的剪切痕迹,也可以看到一部分散点分布的膨润土,图 7(d)中的阴影部分为水化膨润土的分布片区,尽管该区没有观察到密布的膨润土点,但肉眼可见明显覆盖了水化膨润土薄层。这说明 GCL(B)+GM 复合衬里复合界面在高压下仍然主要表现为界面破坏,而散点膨润土分布的区域正是发生 GCL 局部内部破坏的区域。从图 7 中可以明显看出,针刺 GCL 内部膨润土在 GCL/GM 界面上的挤出量随法向应力的增加而增大,该结果符合已有的研究规律<sup>[16]</sup>。

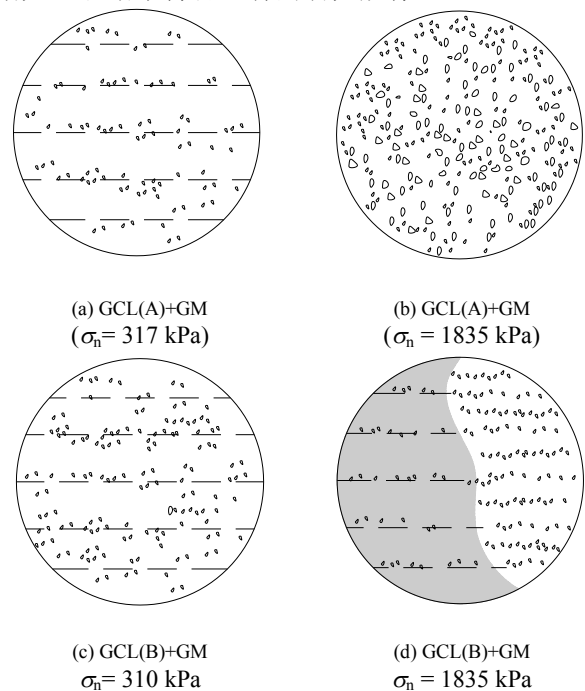


图 7 单剪试验后膨润土在 GM 糙面上的分布示意图

Fig. 7 Schematic diagram of distribution of bentonite on GM surface after simple shear tests



## 6 结 论

利用改进的大单剪仪,开展了不限定剪切破坏面的水化针刺 GCL+GM 复合衬里单剪试验,得到如下 3 点结论。

(1) 对于 GCL(A)+GM 复合衬里单剪,法向应力较小时 ( $\sigma_n \leq 317$  kPa),复合衬里在 GCL/GM 界面产生剪切破坏;在  $\sigma_n = 501$  kPa 左右,复合衬里中 GCL/GM 界面和 GCL 内部同时发生破坏;当  $\sigma_n \geq 725$  kPa 时,复合衬里的剪切破坏发生于 GCL 内部。

(2) 对于 GCL(B)+GM 复合衬里单剪,复合衬里的剪切破坏面主要发生在 GCL/GM 界面上,当法向应力较大时 ( $\sigma_n \geq 713$  kPa),针刺 GCL 内部会出现局部破坏。

(3) 水化针刺 GCL+GM 复合衬里的单剪峰值强度包线表现出较强的非线性,相对于 GCL(B)+GM 复合衬里,GCL(A)+GM 复合衬里具有更高的峰值剪切强度。即工程中将针刺 GCL 的无纺面与 GM 的糙面接触更有利于填埋场边坡的稳定安全。

### 参考文献:

- [1] 钱学德, 施建勇, 刘晓东. 现代卫生填埋场的设计与施工 [M]. 2 版. 北京: 中国建筑工业出版社, 2011. (QIAN Xue-de, SHI Jian-yong, LIU Xiao-dong. Design and construction of modern sanitary landfills[M]. 2nd ed. Beijing: China Architecture and Building Press, 2011. (in Chinese) )
- [2] KOERNER R M, SOONG T Y. Stability assessment of ten large landfill failures[C]// Advances in Transportation and Geoenvironmental Systems Using Geosynthetics, Proceedings of Sessions of GeoDenver 2000. Denver, ASCE, Geotechnical Special Publication (103), 2000: 1 - 38.
- [3] CHIU P, FOX P J. Internal and interface shear strengths of unreinforced and needle-punched geosynthetic clay liners[J]. Geosynthetics International, 2004, **11**(3): 176 - 199.
- [4] FOX P J, STARK T D. State-of-the-art report: GCL shear strength and its measurement[J]. Geosynthetics International, 2004, **11**(3): 141 - 175.
- [5] 施建勇, 钱学德, 朱月兵. 垃圾填埋场土工合成材料的界面特性试验方法研究[J]. 岩土工程学报, 2010, **32**(5): 688 - 692. (SHI Jian-yong, QIAN Xue-de, ZHU Yue-bing. Experimental methods for interface behaviors of geosynthetics in landfills[J]. Chinese Journal of Geotechnical Engineering, 2010, **32**(5): 688 - 692. (in Chinese))
- [6] 钱学德, 施建勇, 刘 慧, 等. 垃圾填埋场多层复合衬垫的破坏面特征[J]. 岩土工程学报, 2011, **33**(6): 840 - 845. (QIAN Xue-de, SHI Jian-yong, LIU Hui, et al. Failure interface behavior of multilayer landfill liner system[J]. Chinese Journal of Geotechnical Engineering, 2011, **33**(6): 840 - 845. (in Chinese))
- [7] EID H T. Shear strength of geosynthetic composite systems for design of landfill liner and cover slopes[J]. Geotextiles and Geomembranes, 2011, **29**(3): 335 - 344.
- [8] FOX P J, ROSS J D. Relationship between NP GCL internal and HDPE GMX/NP GCL interface shear strengths[J]. Journal of Geotechnical and Geoenvironmental Engineering, 2011, **137**(8): 743 - 753.
- [9] EID H T, STARK T D. Shear behavior of an unreinforced geosynthetic clay liner[J]. Geosynthetics International, 1997, **4**(6): 645 - 659.
- [10] FOX P J, ROWLAND M G, SCHEITHE J R. Internal shear strength of three geosynthetic clay liners[J]. Journal of Geotechnical and Geoenvironmental Engineering, 1998, **124**(10): 933 - 944.
- [11] GILBERT R B, FERNANDEZ F, HORSFIELD D W. Shear strength of reinforced geosynthetic clay liner[J]. Journal of Geotechnical and Geoenvironmental Engineering, 1996, **122**(4): 259 - 265.
- [12] TRIPLETTE E J, FOX P J. Shear strength of HDPE geomembrane/geosynthetic clay liner interfaces[J]. Journal of Geotechnical and Geoenvironmental Engineering, 2001, **127**(6): 543 - 552.
- [13] ZORNBERG J G, MCCARTNEY J S, SWAN J R H. Analysis of a large database of GCL internal shear strength results[J]. Journal of Geotechnical and Geoenvironmental Engineering, 2005, **131**(3): 367 - 380.
- [14] MCCARTNEY J S, ZORNBERG J G, SWAN J R H. Analysis of a large database of GCL-geomembrane interface shear strength results[J]. Journal of Geotechnical and Geoenvironmental Engineering, 2009, **135**(2): 209 - 223.
- [15] FOX P J, KIM R H. Effect of progressive failure on measured shear strength of geomembrane/GCL interface[J]. Journal of Geotechnical and Geoenvironmental Engineering, 2008, **134**(4): 459 - 469.
- [16] 林伟岸, 詹良通, 陈云敏, 等. GCL/GM 界面膨润土挤出机理研究[J]. 岩土工程学报, 2011, **32**(6): 832 - 837. (LIN Wei-an, ZHAN Liang-tong, CHEN Yun-min, et al. Mechanism of bentonite extrusion of GCL/GM interface[J]. Chinese Journal of Geotechnical Engineering, 2011, **32**(6): 832 - 837. (in Chinese))